第37卷 第6期
2020年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 37 No. 6
Nov. 2020

不同果农复合种植模式土壤入渗能力及其影响因素

孟凡旭[1,2,3]， 王树森[1,2,3]， 马迎梅[1,2,3]， 秦富仓[1,2,3]，
罗于洋[1,2,3]， 王迪海[4]， 郭 宇[1]， 郭向东[1]

（1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院，内蒙古 呼和浩特 010018；2. 国家林业局荒漠生态系统保护与修复重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010018；3. 内蒙古自治区风沙物理与防沙治沙工程重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010018；4. 西北农林科技大学林学院，陕西 杨凌 712100）

摘 要：为研究残塬沟壑区苹果园不同果农复合种植模式下土壤入渗能力及其影响因素，采用野外双环入渗法测定了永寿县果-荒(CK)果-草(M1)果-蔬(M2)果-粮(M3)复合种植模式下苹果园的土壤水分入渗参数，使用相关性分析和线性冗余分析研究了土壤入渗特征参数的影响因素。利用3种常用的土壤入渗模型对4种果园入渗过程进行拟合。结果表明：4种果农复合种植模式下果园土壤初始入渗速率在7.18~13.57 mm·min^{-1}；稳定入渗速率在1.87~2.94 mm·min^{-1}；平均入渗速率在3.36~5.65 mm·min^{-1}；累计入渗量在260.51~423.65 mm，各果农复合种植模式苹果园初始入渗速率和平均入渗速率表现为M1>M3>M2>CK；稳定入渗速率和累计入渗量表现为M1>M2>M3>CK，M1样地各入渗指标显著大于其他管理模式样地，CK样地各入渗特征指标最小。相关性分析发现，土壤入渗特征指标与土壤容重、黏粒含量和粉粒含量呈负相关；与最大持水、最小持水量、毛管持水量、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙沙粒含量呈正相关。线性冗余分析结果表明，土壤粉粒含量、土壤孔隙度、土壤持水量、土壤容重是影响土壤入渗能力的主要的因素。主成分分析评价的土壤入渗能力排序为M1(2.75)>M2(0.04)>M3(−0.63)>CK(−2.17)，苹果园林下种植作物能够有效的增加土壤入渗能力。比较3种模型发现，蒋定生模型对残塬沟壑区4种果农复合种植模式果园土壤入渗过程的拟合精度较高(R^2=0.97)，适用于描述该地区土壤入渗的实际情况。

关键词：残塬沟壑区；复合种植模式；土壤入渗；入渗模型；影响因素；陕西

土壤入渗是指降水或灌溉水通过地表进入土壤的过程[1]，是降雨、地表水、土壤水和地下水相互转化的重要环节之一[2]。土壤入渗直接影响着植物对土壤水分的吸收利用、土壤水肥迁移、地表产流产沙、降雨再分配等问题[3]。目前，国内外学者在土壤入渗方面进行了很多研究，并取得重要成果，其中Kostiakov模型、Horton模型、蒋定生模型都是国内外学者在研究过程中提出的入渗方程，对土壤入渗过程均能够较好的阐释。同时，关于土壤入渗方面的研究主要集中于林地[4]、草地[5]及农田[6]等自然生态系统和人工生态系统，果园作为受人为干预的半自然生态系统，关于土壤入渗的研究较少[7]，同时果园内多种果农复合种植模式对果园内土壤理化性质产生直接的影响[8]，合理的果农复合种植模式能够以物理手段提升土壤中质量，对改善果树水肥条件和生长环境具有重要意义[9]，而苹果园果农复合种植模式对土壤入渗能力产生的影响鲜见报道。

陕西残塬沟壑区地形破碎，气候干燥，降水分布不均，是我国生态环境最为脆弱的地区之一[10]。近几年，随着国家扶贫政策的推进，苹果产业已成为该地区主导产业之一，在带动区域农业经济中发挥着重要的作用。然而，果园作为耗水强度和耗水深度较高的高耗水作物，其大面积种植加剧了该地区的水资源供需矛盾，使得水分成为制约苹果生长及产量等的重要因素[11]。已有研究表明，黄土塬区高龄苹果园土壤剖面普遍存在干燥化现象，干层深

收稿日期：2020-01-10； **修订日期：**2020-04-27
基金项目：国家重点研发计划课题：残塬沟壑区人工林景观化经营关键技术和示范项目(2017YFC0504605)资助
作者简介：孟凡旭(1995-)，男，硕士研究生，主要从事水土保持与荒漠化防治方面的研究. E-mail: 351450024@qq.com
通讯作者：王树森. E-mail: wsswtt@126.com

度甚至可达10 m以下[12]。干层的存在一定程度上阻碍了雨水对深层土壤水的补给[13],对苹果生产具有潜在危害性。研究残塬沟壑区不同果农复合种植模式下土壤入渗特征及其主要影响因子可以更好地了解当前果园管理模式的合理性,为残塬沟壑区苹果园果农复合种植模式的选择提供数据支持,对于苹果园的可持续性发展具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

实验样地位于陕西省咸阳市永寿县马坊塬[14],地理位置为34°29′~34°59′N,107°56′~108°20′E,该区位于渭北高原南缘,属暖温带大陆性气候。年平均气温10.2 ℃,平均降雨量610.66 mm,无霜期210 d,土壤母质为第四纪风积黄土,属于褐土土类,塿土亚类。地下水埋深20~120 m。属典型的旱作农业区,试验地周围无污染源。苹果(*Malus pumila* Mill.)经济林种植面积较大,果业收入占农民收入40%以上。该地区耕层土壤有机质含量为11.66 g·kg^{-1},碱解氮含量为26.69 mg·kg^{-1},速效磷含量为16.94 mg·kg^{-1},速效钾含量为100.59 mg·kg^{-1},pH为7.65,容重1.30 g·cm^{-3}。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择 根据果农复合种植模式的不同,选取了果-荒(CK)(苹果+人工除草)、果-草(M1)[苹果+藜(*Chenopodium album* L.)+马唐(*Digitaria sanguinalis* Scop.)]、果-蔬(M2)[苹果+甘蓝(*Brassica oleracea* L.)]、果-粮(M3)[苹果+玉米(*Zea mays* L.)]4种具有代表性的果农复合种植模式果园,试验果园均位于同一塬面上的连片果园,品种均为红富士,砧木为楸子(*Malus prunifolia* Borkh.),果树树龄为20 a,栽植密度4 m×4 m,各复合种植模式化肥施用量、有机肥施用量等农事管理一致。

1.2.2 土壤入渗能力测定 土壤入渗试验于2018年7月在陕西省咸阳市永寿县马坊镇果园进行,各果园均在同一塬面34.776°~34.781°N,108.162°~108.299°E),海拔在1022~1031 m,受环境差异性影响较小。分别在上述4种果农复合种植模式苹果园各选取2个面积为400 m^2(20 m×20 m)的样地,共计8个样地。每个样地选取3个较为平整的试验地进行双环入渗试验。试验所用双环内环直径10 cm,外环直径20 cm,内外环高均为20 cm。试验前去除地表作物,将圆环用橡胶锤缓慢均匀地打入土中15 cm,尽量保持土壤结构不受破坏。然后向内外环中同时注水,当内环和外环水深达到3 cm时开始用秒表计时。并分别在0、0.5、1、2、3、5、7、10、15、20、25、30 min及之后每10 min读取供水桶标尺刻度,直到达到稳渗状态停止试验。试验过程中保持内外环水面高度为3 cm,读数时一并读取水温。为了减少土壤含水量对试验结果的影响,试验时间相对集中,同时确保在入渗实验前15 d内研究区未发生降雨。在土壤入渗能力测定同时每个试验地按照10 cm为1个土层,使用环刀逐层采集0~50 cm土壤样品各3个用于土壤容重、最大持水量、最小持水量、毛管持水量、非毛管孔隙度、毛管孔隙度、总孔隙度等土壤指标的测定。具体分析方法参照《森林土壤分析方法》[15]。各样地基本情况见表1。

1.2.3 土壤水分入渗模型的选择 土壤入渗模型是研究土壤入渗的重要方法,国内外学者建立了许多土壤入渗经验模型,用来模拟土壤入渗随时间变化特征,本研究选用3种比较经典的土壤入渗经验模型对实测数据进行拟合,即Horton模型、Kostiakov模型和蒋定生模型[16],各模型公式及参数见表2。

1.3 数据统计与分析

试验数据使用Origin 2018、SPSS 20.0和Canoco 5.0进行绘图与分析。所有数据均经正态分布检验,对非正态分布的数据进行平方根变换。采用单因

表1 试验区土壤理化性质

Tab.1 Basic physical and chemical properties of the soil in the study area

复合种植模式	样地	有机质/(g·kg^{-1})	pH	容重/(g·cm^{-3})	最大持水量/mm	最小持水量/mm	毛管持水量/mm	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	总孔隙度/%	黏粒/%	粉粒/%	沙粒/%
果-荒	CK	10.93	7.44	1.24	41.90	30.03	33.55	41.29	10.40	10.75	0.08	96.02	3.90
果-草	M1	12.40	7.82	1.42	31.83	24.12	27.11	38.13	6.62	12.09	0.14	89.66	10.20
果-蔬	M2	11.88	7.92	1.31	34.08	26.32	29.79	38.97	5.63	11.92	0.34	91.22	8.45
果-粮	M3	12.64	7.33	1.28	38.43	29.14	32.89	41.93	7.11	11.51	0.27	90.66	9.08

表2 土壤水分入渗模型公式及参数说明

Tab.2 Formulas of soil water infiltration model and explanation of its parameters

模型名称	公式	参数说明
Horton	$f(t)=f_c+(f_0-f_c)e^{-kt}$	f_0 和 f_c 分别为初始入渗速率和稳定入渗速率;k 为经验参数;t 为入渗时间
Kostiakov	$f(t)=at^{-b}$	a 为初始入渗速率;t 为入渗时间;b 为衰减系数
蒋定生	$f(t)=f_c+(f_1-f_c)/t^{-b}$	f_1 和 f_c 分别为初始入渗速率和稳定入渗速率;b 为指数;t 为时间

素方差分析(one-way ANOVA)对不同果农复合种植模式果园入渗参数进行差异性分析。用Pearson相关性分析和线性冗余分析(RDA)来表示土壤入渗特征与土壤物理性质之间的关系。

2 结果与分析

2.1 不同果农复合种植模式果园土壤入渗特征

由图1可知,研究区各果农复合种植模式果园土壤入渗速率前10 min内急速下降,处于瞬变阶段。此期间水分主要是在分子力的作用下向下运动。在入渗开始10 min时各样地平均入渗速率较1 min时下降了66%。在10~60 min期间处于渗漏阶段,入渗速率下降幅度明显变缓。同时,在此期间入渗速率会存在明显的波动。入渗开始60 min后土壤入渗速率达到相对稳定的状态。结合累计入渗量变化来看,由于入渗前期土壤入渗速率较快,因此入渗开始时累计入渗量增张幅度较大,而到达60 min后土壤入渗速率达到稳定状态,累计入渗量斜率不再变化,且不同果农复合种植模式土壤累积入渗量曲线斜率差异明显。

从表3可以看出,M1样地各入渗特征指标都是最大的,该样地入渗能力要高于其他样地。各果农复合种植模式果园初始入渗速率和平均入渗速率表现为:M1>M3>M2>CK;稳定入渗速率和累计入渗量表现为:M1>M2>M3>CK,其中CK样地各入渗特征指标与其他3种果农复合种植模式样地差异显著。

2.2 土壤入渗特征影响因素分析

土壤入渗是一个复杂过程,受多种因素的影响,选取土壤容重、最大持水、最小持水量、毛管持水量、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度、黏粒含量、粉粒含量、沙粒含量10个土壤环境因子作为影响因子,使用Pearson相关性分析和线性冗余分析(RDA)来表示土壤入渗特征与土壤环境因子之间关系。结果表明,土壤各入渗特征指标与容重、黏粒含量和粉粒含量呈负相关;与其他土壤性质呈正

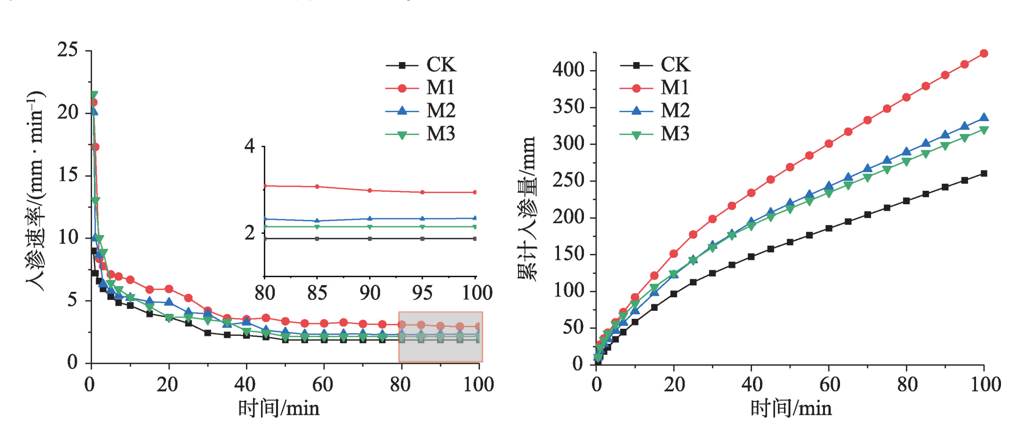


图1 不同果农复合种植模式土壤入渗过程

Fig. 1 Soil infiltration process under different fruit-agriculture intercropping patterns

表3 不同果农复合种植模式土壤入渗特征

Tab.3 Soil infiltration characteristics under different fruit-agriculture intercropping patterns

复合种植模式	初始入渗速率/(mm·min^{-1})	稳定入渗速率/(mm·min^{-1})	平均入渗速率/(mm·min^{-1})	累计入渗量/mm
CK	7.18±0.09c	1.87±0.02c	3.36±0.07c	260.51±4.26d
M1	13.57±0.29a	2.94±0.09a	5.65±0.12a	423.65±6.32a
M2	11.29±0.16b	2.34±0.06b	4.56±0.14b	335.71±8.82b
M3	13.38±0.14a	2.15±0.09b	4.74±0.13b	320.58±5.28c

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

表4 土壤入渗特征与土壤因子相关关系矩阵

Tab.4 Matrix of correlation between soil infiltration characteristics and soil factors

指标	容重	最大持水量	最小持水量	毛管持水量	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	总孔隙度	黏粒含量	粉粒含量	沙粒含量
初渗速率	−0.886**	0.821**	0.843**	0.901**	0.847**	0.385	0.774*	−0.117	−0.890**	0.878**
稳渗速率	−0.596	0.664*	0.562	0.495	0.337	0.707*	0.552	−0.345	−0.457	0.443
平均入渗速率	−0.799**	0.805**	0.762*	0.757*	0.645*	0.543	0.724*	−0.133	−0.756**	0.743**
累计入渗量	−0.668*	0.720*	0.634*	0.585	0.44	0.6	0.617	−0.289	−0.805**	0.801**

注:*表示在0.05水平上显著相关;**表示在0.01水平显著相关。

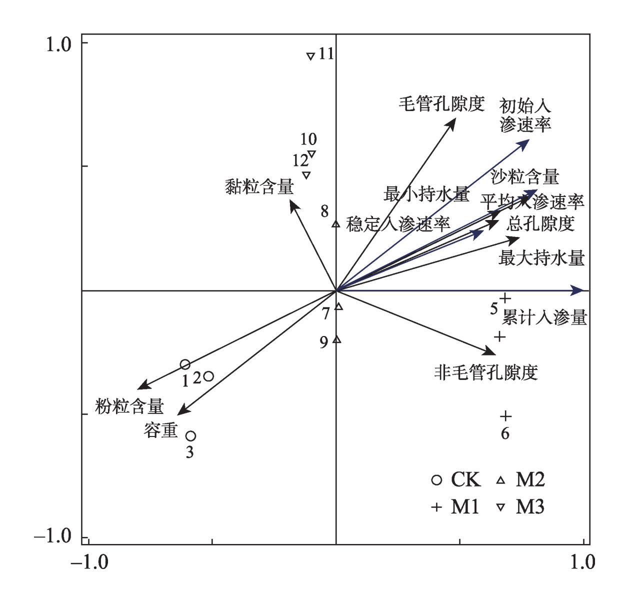


图2 土壤入渗特征与土壤因子RDA排序

Fig. 2 Soil infiltration characteristics and soil factor RDA ranking map

相关(表4,图2)。

从Pearson相关性分析结果来看(表4),土壤初渗速率、平均入渗速率与土壤容重和粉粒含量呈极显著负相关;累计入渗量与容重呈显著负相关,与粉粒含量呈极显著负相关。容重越大,粉粒含量越多,入渗性能越差。入渗特征指标与最大持水量、最小持水量、毛管持水量、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度、沙粒含量呈正相关。黏粒含量对该地区土壤入渗特征影响均不显著。

为进一步说明究竟哪种土壤因子与入渗特征指标关系更密切,采用线性冗余分析对10个土壤因子与入渗关系进行分析。从土壤因子影响土壤入渗特征的RDA分析结果来看(表5,图2),本文所选指标共解释土壤入渗特征的99.4%。其中土壤粉粒含量与各入渗指标负相关性最强;土壤非毛管孔隙度与各入渗指标正相关性最强(图2)。各土壤环境因子对土壤入渗特征影响贡献度(表5)表现为粉粒含量最大,为54.8%,其次为总孔隙度、非毛管孔隙度、最小持水量、最大持水量。说明土壤颗粒组、土壤孔隙度、土壤持水能力是影响土壤入渗特征的主要因素。

表5 土壤因子对土壤入渗特征影响贡献度

Tab.5 Contribution of soil factors to soil infiltration characteristics

土壤因子	解释率/%	F	P
粉粒含量	54.8	18.4	0.002**
总孔隙度	18.2	3.4	0.084
非毛管孔隙度	7.7	2.5	0.126
最小持水量	6.7	5.7	0.044*
最大持水量	5.6	2.9	0.116
黏粒含量	4.3	7.8	0.046*
容重	1.4	26.1	0.02*
毛管孔隙度	1.2	3	0.166
沙粒含量	0.1	8.4	0.194

2.3 不同果农复合种植模式果园土壤入渗能力评价

为了评价不同果农复合种植模式下残塬沟壑区苹果园土壤入渗能力,采用SPSS软件对初始入渗速率(X_1)、稳定入渗速率(X_2)、平均入渗速率(X_3)、累计入渗量(X_4)4个因素进行主成分分析,得出主成分方程,计算各复合种植土壤渗透能力得分。表6显示2个主成分贡献率达到98.28%,可以准确的对总方差进行解释,能够解释为土壤入渗能力的量度。其主成分方程为P_1=0.491X_1+0.458X_2+0.521X_3+0.528X_4;P_2=−0.545X_1+0.740X_2−0.340X_3+0.200X_4。

将标准化后的土壤入渗特征参数代入主成分方程,计算得到不同果农复合种植模式下各样地的

表6 土壤水分入渗能力的PCA分析

Tab.6 PCA analysis of soil water infiltration capacity

主成分	X_1	X_2	X_3	X_4	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
P_1	0.491	0.458	0.521	0.528	3.444	86.09	86.09
P_2	−0.545	0.740	−0.340	0.200	0.487	12.19	98.28

表7　土壤入渗能力评价

Tab.7　Evaluation of soil infiltration capacity

复合种植模式	P_1	P_2	得分	排序
CK	−2.41	0.24	−2.17	4
M1	2.28	0.47	2.75	1
M2	0	0.04	0.04	2
M3	0.13	−0.76	−0.63	3

得分,表7显示,不同果农复合种植模式下土壤入渗能力强弱排序为:果-草(M1)>果-蔬(M2)>果-粮(M3)>果-荒(CK)。果-草(M1)、果-蔬(M2)、果-粮(M3)样地因存在草本,使得植物根系较多,地表土质疏松,所以土壤入渗能力较强。果-荒(CK)样地由于除草的原因,植物根系稀少,土壤结构差,所以土壤入渗能力最弱。

2.4　入渗速率的模型拟合与评价

由于土壤入渗是在一定时间内逐渐减缓的过程,土壤的初始入渗速率很大,而稳定入渗速率则较小。不同果农复合种植模式下,不同入渗模型对土壤的初始入渗和稳定入渗阶段拟合的效果也不相同,因此,本研究使用3种常用的土壤入渗经验模型对实测数据进行拟合(表8)。

表8显示,不同果农复合种植模式土壤入渗过程的模型拟合优度存在差异,从大到小为:蒋定生模型>Kostiakov模型>Horton模型。其中,蒋定生模型的决定系数为0.96 ~ 0.99,平均值为0.97,Kostiakov模型的决定系数为0.93 ~ 096,平均值为0.95。Horton模型的决定系数为0.91 ~ 0.96,平均值为0.93。蒋定生模型能较好的反应不同果农复合种植模式下的土壤水入渗的实际情况,可以更准确的对残塬沟壑区不同果农复合种植模式下苹果园土壤水的入渗过程和入渗能力进行模拟分析。

使用平均相对误差和均方根误差对各模型拟合优度进行对比分析(表9),结果显示:Horton模型、Kostiakov模型、蒋定生模型的平均相对误差的变化范围分别是5.49% ~ 39.95%、7.93% ~ 12.36%、7.31% ~ 15.33%,均方根误差的变化范围分别是0.38~1.42 mm·min^{-1}、0.40~1.01 mm·min^{-1}、0.26~0.87 mm·min^{-1}。对比3个模型可知,蒋定生模型的相对误差较小,与土壤入渗的实测过程更贴近。因此,结合各个样地土壤入渗模型拟合优度和平均相对误差的大小,认为蒋定生模型更符合残塬沟壑区土壤入渗的实际过程,可以更好地模拟其入渗过程。

表8　土壤入渗模型拟合参数

Tab.8　Fitting parameters of soil infiltration model

复合种植模式	Horton模型				Kostiakov模型			蒋定生模型			
	f_c	f_0	k	R^2	a	b	R^2	f_c	f_1	b	R^2
CK	1.90	7.84	0.08	0.96	7.69	0.30	0.96	−5.97	7.65	0.10	0.98
M1	4.02	26.95	0.62	0.91	15.29	0.39	0.95	2.19	12.87	0.57	0.96
M2	3.29	26	0.82	0.91	12.93	0.42	0.93	2.27	10.18	0.72	0.96
M3	2.84	22.50	0.41	0.92	14.68	0.46	0.95	1.04	12.44	0.55	0.99

表9　实测入渗过程与模拟值误差比较

Tab.9　Error comparison of the measured soil infiltration rate and the calculated value

复合种植模式	Horton模型		Kostiakov模型		蒋定生模型	
	MRE/%	RMSE/(mm·min^{-1})	MRE/%	RMSIE/(mm·min^{-1})	MRE/%	RMSIE/(mm·min^{-1})
CK	5.49	0.38	12.24	0.40	9.07	0.26
M1	17.19	1.39	10.51	1.01	9.40	0.87
M2	39.95	1.42	12.36	1.01	15.33	0.79
M3	25.28	1.22	7.93	0.51	7.31	0.43

注:MRE为平均相对误差;RMSE为均方根误差。

3 讨 论

土壤水分入渗过程是水分在分子力、毛管力和重力的综合作用下在土壤中运动的物理过程,入渗按土壤水分受力情况及运行特征可分3个阶段[17],即渗润阶段、渗漏阶段和渗透阶段段。本文研究发现,不同果农复合种植模式果园土壤入渗过程存在差异,但是都具有初渗速率>平均入渗速率>稳定入渗速率。究其原因,渗润阶段水分主要受分子力作用,被土壤颗粒吸附而形成薄膜水,对于干燥的土壤,该阶段入渗率明显大于其他阶段。渗漏阶段下渗水主要受到重力和毛细管引力,该阶段土壤水主要在土壤颗粒间的孔隙移动,并开始充填孔隙,直至充满水,此阶段下渗速率迅速递减。渗透阶段土壤孔隙已被水充满达到饱和,水分在重力作用下移动,属于饱和水流运动,水分入渗率维持稳定[18]。

对果园入渗方面的研究大多是从不同类型果园方面进行[7],但是对于不同果农复合种植模式下果园入渗能力的变化报道较少。农林生产过程中多样的管理方式具有改善生态系统服务功能的作用[8],同时也会改变土壤理化性质,直接或间接影响着土壤入渗能力。苹果园林下作物及其根系分布对土壤粒度组成、孔隙度等物理性质有着较大的改善作用[19-20],林下作物不仅可以在一定程度上削减雨滴对土壤的打击力,还能够分解为土壤所需要的养分,改善土壤结构[21];较为发达的植物根系可以将有机质纳入土壤[22],同样也能够改善土壤结构。根系在死亡腐烂后会使土壤存在优先通道[23],进而增加土壤水流的下渗,对入渗起到促进作用。果农复合种植模式的变化同样影响着小型土壤动物的变化,林下生草可以明显的增加小型土壤动物的数量[24],小型土壤动物的存在对土壤性质的改善同样也起到了一定的作用。而CK样地在果树生长期间在除草时会对土壤表面践踏,这也是土壤入渗速率降低的主要原因。本文研究还发现,林下存在草本层的各样地土壤入渗能力明显要优于除草样地,其结果可归结于不同果农复合种植模式下草本根系生物量、根系活动、土壤动物的变化以及人为活动影响而导致。同时M2和M3样地土壤入渗速率也小于M1样地,其原因主要是虽然M2和M3林下存在植被,但是M2和M3林下植被的密度要远小于生草的密度。同时农作物和蔬菜会在其成熟后移出果园,仅剩余植物的根系。因此果蔬间作与果农间作样地土壤入渗能力要小于生草样地。

不同果农复合种植模式果园,土壤理化特性也存在相应差异,直接或间接影响着土壤入渗能力。本文使用相关性分析和RDA分析对影响入渗特征的土壤物理性质进行了分析,结果表明土壤颗粒组成。孔隙度和容重是影响该地区土壤入渗特征的几个最主要因素。其中粉粒含量、容重、黏粒含量对土壤入渗起着负向的影响,即粉粒含量、黏粒含量和容重越大土壤入渗能力越差;其他几个指标对土壤入渗起着正向的影响。这与吕刚等[25]和李卓[26]的结果一致。在各指标中黏粒含量对土壤入渗的负向影响不显著,其原因主要是由于研究区土壤以粉粒含量为主,其次为沙粒含量,黏粒含量所占比例较小,含量仅在0.08%~0.34%之间(表1)。

土壤入渗模型是研究土壤入渗的重要方法,土壤入渗模型能够表达入渗速率随时间变化规律,从而对土壤入渗过程作出定性或定量的评价。3种常用模型对残塬沟壑区苹果园土壤入渗过程拟合优度从大到小为:蒋定生模型、Kostiakov模型、Horton模型,其中Kostiakov模型是假设起始时的入渗速率是无穷大[27],当时间无限增大时,入渗速率将趋近于0。但在本文中,由于在垂直入渗的情况下有重力势的作用,入渗速率最后会接近于稳定入渗率后保持稳定。而蒋定生模型和Horton模型均增加了常数项以反映无限长时在重力作用下达到了稳定入渗[28],这更符合土壤水动力学。蒋定生模型和Horton模型2个模型中,蒋定生模型具有更大的拟合优度,因此,蒋定生模型更适宜描述残塬沟壑区苹果园土壤入渗过程,这与吴秋菊等[29]在黄土区的研究结果一致。开展不同果农复合种植模式对土壤入渗能力变化的研究可以为果园管理方式的选择提供依据。

4 结 论

通过野外双环入渗实验对残塬沟壑区苹果园4种果农复合种植模式土壤入渗过程进行观测,评价3种常用入渗模型在残塬沟壑区果园适用性,分析容重等10个土壤环境因子对土壤入渗特征指标的影响,最后使用主成分分析法评价了4种苹果园土壤入渗能力。通过分析得出以下4个结论:

（1）4种果农复合种植模式果园土壤初始入渗速率在7.18~13.57 mm·min^{-1}之间；稳定入渗速率在1.87~2.94 mm·min^{-1}之间；平均入渗速率在3.36~5.65 mm·min^{-1}之间；累计入渗量在260.51~423.65 mm·min^{-1}之间，各果农复合种植模式果园入渗特征参数存在显著差异。

（2）相关性分析表明：在所选取的10个土壤环境因子中。土壤入渗特征指标与土壤容重、黏粒含量和粉粒含量呈负相关；与最大持水、最小持水量、毛管持水量、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙沙粒含量呈正相关。RDA分析表明：10个土壤环境因子共解释土壤入渗特征总变量的99.4%。各土壤因子中，土壤粉粒含量、土壤孔隙度、土壤持水量、土壤容重是影响该地区苹果园土壤入渗能力的4个主要的因素。

（3）主成分分析表明所选用的4个入渗特征指标对土壤入渗能力的贡献量达到了98.28%，不同果农复合种植模式果园土壤入渗能力排序：M1（2.75）>M2（0.04）>M3（−0.63）>CK（−2.17），苹果园林下种植作物能够有效的增加土壤入渗能力。

（4）不同果农复合种植模式土壤入渗过程的模型拟合优度存在一定差异，其拟合优度依次为蒋定生模型（0.97）>Kostiakov模型（0.95）>Horton模型（0.93），其中蒋定生模型较符合黄土残塬沟壑区苹果园土壤入渗的实际情况。

参考文献（References）：

[1] 吕刚, 吴祥云. 土壤入渗特性影响因素研究综述[J]. 中国农学通报, 2008, 25(7): 494−499. [Lyu Gang, Wu Xiangyun. Review on influential factors of soil infiltration characteristics[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 25(7): 494−499.]

[2] 徐敬华, 王国梁, 陈云明, 等. 黄土丘陵区退耕地土壤水分入渗特征及影响因素[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(2): 19−25. [Xu Jinghua, Wang Guoliang, Chen Yunming, et al. Infiltration characteristics of soil and its influencing factors in abandoned farmland in the Hilly-gully Region of Loess Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(2): 19−25.]

[3] 陈新均, 王学全, 卢琦, 等. 季节性河道土壤水分及其渗漏特征初探[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 97−104. [Chen Xinjun, Wang Xuequan, Lu Qi, et al. Soil moisture content and soil water infiltration in seasonal watercourse in Arid Area[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 97−104.]

[4] 张敬晓, 汪星, 汪有科, 等. 黄土丘陵区林地干化土壤降雨入渗及水分迁移规律[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 231−238. [Zhang Jingxiao, Wang Xing, Wang Youke, et al. Regularities of rainfall infiltration and water migration in woodland drying soil in the Loess Hilly Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(3): 231−238.]

[5] 何子森, 肖培青, 郝仕龙, 等. 黄丘区野外草被坡面土壤入渗参数变化规律与模拟研究[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 74−79. [He Zimiao, Xiao Peiqing, Hao Shilong, et al. Study on the change and simulation of soil infiltration parameters on the field grass slope in the Loess Hilly Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(2): 74−79.]

[6] 张治伟, 朱章雄, 王燕, 等. 岩溶坡地不同利用类型土壤入渗性能及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 71−76. [Zhang Zhiwei, Zhu Zhangxiong, Wang Yan, et al. Soil infiltration capacity and its influencing factors of different land use types in Karst slope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(6): 71−76.]

[7] 林代杰, 郑子成, 张锡洲, 等. 不同土地利用方式下土壤入渗特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 33−36. [Lin Daijie, Zheng Zicheng, Zhang Xizhou, et al. Characteristic and influencing factors of soil infiltration of different land use patterns [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(1): 33−36.]

[8] Demestihas C , Daniel Plénet, Michel Génard, et al. Analyzing ecosystem services in apple orchards using the STICS model[J]. European Journal of Agronomy, 2018, 94: 108−119.

[9] Wang J , Huang J , Zhao X , et al. Simulated study on effects of ground managements on soil water and available nutrients in Jujube orchards[J]. Land Degradation & Development, 2016, 27(1): 35−42.

[10] 张静伟. 渭北黄土高原水土保持林现状及可持续经营研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010. [Zhang Jingwei. Study on Statusquo and Sustainable Management of Soil and Water Conservation Forest on Weibei of Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2010.]

[11] 曹铨, 王自奎, 沈禹颖. 陇东苹果园生草复合体系土壤水分季节动态[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 77−84. [Cao Quan, Wang Zikui, Shen Yuying. Seasonal variation of soil moisture content in apple orchard and grass intercropping system in Longdong[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(1): 77−84.]

[12] 包睿, 邹养军, 马锋旺, 等. 种植年限及密度对渭北旱塬苹果园深层土壤干燥化的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(15): 143−149. [Bao Rui, Zou Yangjun, Ma Fengwang, et al. Effects of planting year and density on deep soil desiccation of apple orchards in Weibei dryland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(15): 143−149.]

[13] 杨泽元, 许登科, 郑志伟, 等. 干表层的概念界定及其水文生态效应研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(2): 77−81, 95. [Yang Zeyuan, Xu Dengke, Zheng Zhiwei, et al. Concept definition of dry surface layer and its hydro-ecological effects[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(2): 77−81, 95.]

[14] 张永. 渭北黄土高原林—草景观界面植被、土壤特征及其关系研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007. [Zhang Yong. Chacteristics and Correlation of Vegetation and Soil at the Boundary of Forest Grass Landscape in Weibei Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2007.]

[15] 孙万儒. 森林土壤分析方法[M]. 北京: 中国标准出版社, 1999. [Sun Wanru. Analytical Method of Forest Soil[M]. Beijing: China Standard Press, 1999.]

[16] 张侃侃, 卜崇峰, 高国雄. 黄土高原生物结皮对土壤水分入渗的影响[J]. 干旱区研究, 2011, 28(5): 808–812. [Zhang Kankan, Bu Chongfeng, Gao Guoxiong. Effect of microbiotic crust on soil water infiltration in the Loess Plateau[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(5): 808–812.]

[17] 吴永胜, 尹瑞平, 何京丽, 等. 毛乌素沙地南缘沙区水分入渗特征及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2016, 33(6): 1318–1324. [Wu Yongsheng, Yin Ruiping, He Jingli, et al. Soil infiltration and its affecting factors in sandy area in the south Mu Us sandy land[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(6): 1318–1324.]

[18] Jimenez C C, Tejedor M, Morillas G, et al. Infiltration rate in andisols: Effect of changes in vegetation cover (Tenerife, Spain)[J]. Journal of Soil & Water Conservation, 2006, 61(3): 153–158.

[19] 秦嗣军, 周恩达, 齐边斌, 等. 三种土壤处理方式对华红苹果光合性能及土壤有机碳行为的影响[J]. 土壤通报, 2017, 48(5): 1197–1202. [Qin Sijun, Zhou Enda, Qi Bianbin, et al. Effect of three different soil treatments on photosynthetic performance of Huahong apple and soil organic carbon [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(5): 1197–1202.]

[20] Jiang X J , Liu W , Chen C , et al. Effects of three morphometric features of roots on soil water flow behavior in three sites in China [J]. Geoderma, 2018, 320: 161–171.

[21] 黄茹, 黄林, 何丙辉, 等. 三峡库区不同林草治理措施下土壤入渗特征研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(9): 119–126. [Huang Ru, Huang Lin, He Binghui, et al. Characteristics of soil water infiltration under different biological regulation measures in Three Gorges Reservoir region[J]. Journal of Southwest University(Natural Science Edition), 2013, 35(9): 119–126.]

[22] 石兰君, 乔晓英, 曾磊, 等. 甘肃黑方台黄土水分运移规律模拟[J]. 干旱区研究, 2018, 35(4): 813–820. [Shi Lanjun, Qiao Xiaoying, Zeng Lei, et al. Loess moisture migration in Heifangtai of Gansu Province[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(4): 813–820.]

[23] Jiang X J, Chen C, Zhu X, et al. Use of dye infiltration experiments and HYDRUS–3D to interpret preferential flow in soil in a rubber–based agroforestry systems in Xishuangbanna, China[J]. Catena, 2019, 178: 120–131.

[24] 罗熳丽, 黄婷婷, 肖玖金, 等. 城市草坪不同管理方式下土壤动物群落结构特征与差异[J]. 浙江农业学报, 2017, 29(11): 1835–1843. [Luo Manli, Huang Tingting, Xiao Jiujin, et al. Characteristics and differences of soil fauna community in different management modes of urban lawn[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2017, 29(11): 1835–1843.]

[25] 吕刚, 翟景轩, 李叶鑫, 等. 辽西北风沙地不同植物群落土壤入渗特性[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(4): 133–139. [Lyu Gang, Zhai Jingxuan, Li Yexin, et al. Soil infiltration characteristics of different plant community in sandy land of northwestern Liaoning[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(4): 133–139.]

[26] 李卓. 土壤机械组成及容重对水分特征参数影响模拟试验研究——以黄土为例[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009. [Li Zhuo. Simulated Experiment on Effects of Soil Mechanical Composition and Soil Bulk Density on Soil Water Characteristic Parameters: Take Loess Soil for Example[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2009.]

[27] 徐勤学, 李春茂, 陈洪松, 等. 喀斯特峰丛坡地灌木林地与梯田旱地土壤水分入渗特征[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 124–131. [Xu Qinxue, Li Chunmao, Chen Hongsong, et al. Characteristics of soil moisture infiltration in shrub land and terraces dryland in Karst peaks hillslopes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(8): 124–131.]

[28] 刘洁, 李贤伟, 纪中华, 等. 元谋干热河谷三种植被恢复模式土壤贮水及入渗特性[J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2331–2340. [Liu Jie, Li Xianwei, Ji Zhonghua, et al. Soil water holding capacities and infiltration characteristics of three vegetation restoration models in dry–hot valley of Yuanmou[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(8): 2331–2340.]

[29] 吴秋菊, 吴佳, 王林华, 等. 黄土区坡耕地土壤结皮对入渗的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(2): 303–311. [Wu Qiuju, Wu Jia, Wang Linhua, et al. Effects of soil crusts on infiltration in slopes land in the Loess area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(2): 303–311.]

Soil infiltration ability and influencing factors under different intercropping patterns in orchards in the gully region of Loess Plateau

MENG Fan-xu[1,2,3], WANG Shu-sen[1,2,3], MA Ying-mei[1,2,3], QIN Fu-cang[1,2,3], LUO Yu-yang[1,2,3], WANG Di-hai[4], GUO Yu[1], GUO Xiang-dong[1]

(1. *College of Desert Control Science and Engineering*, *Inner Mongolia Agricultural University*, *Hohhot* 010018 *Inner Mongolia*, *China*; 2. *Key Laboratory of State Forest Administration for Desert Ecosystem Protection and Restoration*, *Hohhot* 010018, *Inner Mongolia*, *China*; 3. *Inner Mongolia Key Laboratory of Aeolian Physics and Sand Control Engineering*, *Hohhot* 010018, *Inner Mongolia*, *China*; 4. *College of Forestry*, *Northwest A&F University*, *Yangling* 712100, *Shaanxi*, *China*)

Abstract: We investigated the soil infiltration characteristics and influencing factors under different fruit-agriculture intercropping patterns below apple trees (*Malus*) in the gully region of Loess Plateau. A double-ring infiltration method was used to measure the soil water infiltration parameters under fruit-agriculture intercropping patterns of Malus-wild (CK), Malus-Herbage (M1), Malus-Brassica (M2), Malus-Zea mays (M3) in the orchards of Yongshou County. Correlation and redundancy analyses (RDA) were used to determine the influencing factors of soil infiltration parameters. Three common soil infiltration modells were used to fit the infiltration processes of four orchards. Under four fruit-agriculture intercropping patterns, the initial orchard soil infiltration rate was 7.18-13.57 $mm \cdot min^{-1}$, the stable infiltration rate was 1.87-2.94 $mm \cdot min^{-1}$, the average infiltration rate was 3.36-5.65 $mm \cdot min^{-1}$, and the cumulative infiltration amount was 260.51-423.65 mm. The initial infiltration rate and average infiltration rate of the four orchards were ranked from highest to lowest as M1>M3>M2>CK; the steady infiltration rate and cumulative infiltration were ranked as M1>M2>M3>CK. The infiltration index of M1 was significantly higher than that of the other fruit-agriculture intercropping patterns, and the infiltration characteristic index of CK was the lowest. The correlation analysis showed that the soil infiltration characteristics were negatively correlated with soil bulk density, clay content, and silt content, and positively correlated with maximum water holding capacity, minimum water holding capacity, capillary water holding capacity, capillary porosity, non-capillary porosity, and total pore sand content. The RDA analysis revealed that the soil silt content, soil porosity, soil water holding capacity, and soil bulk density were the main factors influencing soil infiltration performance. Soil infiltration ability was ranked as M1 (2.75)>M2(0.04)>M3(-0.63)>CK(-2.17) by principal component analysis. Therefore, planting crops under apple orchards could effectively increase soil infiltration ability. Comparing the three models, Jiang Dingsheng's model had a high fitting accuracy (R^2=0.97) for the soil infiltration processes of orchards under four fruit-agriculture intercropping patterns in the gully region of Loess Plateau, which was suitable for describing the actual situation of soil infiltration in this area.

Keywords: gully region of Loess Plateau; fruit-agriculture intercropping patterns; soil infiltration; infiltration model; influence factor; Shaanxi